

逆向 FTF 方法在船用燃气轮机故障分析中的应用

刘永葆¹, 韩凤科², 王开奇¹

(1. 海军工程大学 动力工程学院, 湖北武汉 430015; 2. 哈尔滨汽轮机厂, 黑龙江 哈尔滨 150046)

摘要: 阐述了故障树分析(FTA)与故障模式影响及危害性分析(FMECA)的特点及两者之间的相互关系, 提出了一种 FTA 与 FMECA 配合使用来分析系统可靠性的逆向 FTF 分析程序, 利用该方法对船用燃气轮机的起动故障进行了定量分析, 确定了系统的薄弱环节, 得到了有实用价值的结论。

关键词: 故障分析; 燃气轮机; FTF

中图分类号: TK47 文献标识码: A

1 前言

在系统故障分析中,“故障模式、影响及危害性分析”(FMECA)、“故障树分析”(FTA)是应用最广泛,也是比较有效的两种分析方法,两者各有优缺点。FMECA 是一种归纳性分析方法^[1],它从分析系统、部件的各种故障模式出发,分析每一故障模式的原因及对上一级系统的影响。分析工作细致,不需要复杂的数字运算,但该方法只是对单一故障模式的孤立分析,不适于多重故障分析,对复杂系统的分析过程,周期长、工作量大,分析结果的表达逻辑性、直观性较差。FTA 是一种演绎性分析方法^[2],它首先把“不希望事件”作为顶事件,自上而下分解,逐步追查引起事件的各种故障因素。该方法表达直观,逻辑性强,可用于多重故障及因人员差错、环境因素等引起的故障的分析,但因故障树(FT)的建造及计算过程较复杂,限制了底事件的数量,因此复杂系统的 FTA 难以做到对事件进行详尽、细致的研究。

在产品使用阶段,对复杂系统故障分析的要求是:一方面,故障分析过程逻辑性强,分析结果准确、表达直观,便于确定故障点;另一方面,还应明确故障的模式及各种模式的危害度,以指导具体的维修活动。经常远离大陆航行的船舶设备,要求管理人员不但能迅速判断故障,而且能正确实施维修,以保证设备正常运行。此时,两方面的要求缺一不可。

由上述分析可知, FMECA 或 FTA 单独使用不能

满足故障诊断与维修的需要,但两者互为补充,如果恰当的结合起来使用,则能扬长避短,发挥各自的优点,满足对复杂船舶系统故障分析的要求。

FTF 分析法是 FMECA 和 FTA 相结合的综合方法,可分为正向 FTF 法和逆向 FTF 法两种。正向 FTF 法首先对系统进行 FMECA,根据其结果确定顶事件,再作 FTA,是一种全面详尽的分析方法,但因为在 FMECA 的基础上对系统进行 FTA,所以对复杂系统分析,周期长、工作量大。逆向 FTF 方法,首先根据系统的功能要求确定顶事件,对系统进行 FTA,然后有针对性的对 FTA 得到的底事件进行 FMECA,这样不仅使分析结果的表达详尽、准确、直观、逻辑性强,而且可以克服正向 FTF 方法中 FMECA 的盲目性,可节约大量的分析时间。本文总结多次 FTA 和 FMECA 分析经验,提出了一种较合理的逆向 FTF 分析程序,并成功地应用于船用燃气轮机的起动故障分析中。

2 逆向 FTF 方法分析程序

逆向 FTF 方法,简单的说是先对系统进行 FTA,再对底事件有针对性地进行 FMECA,但具体使用中却有一定的技巧,只有充分利用两种技术的优点,避其缺点,按优化的分析程序进行,才能使分析过程既节约时间又能得到准确、详尽的结果。笔者在认真研究两种方法特点的基础上,通过大量的实践,归纳出了图 1 所示的逆向 FTF 分析程序,该分析程序,首先初步建立系统的 FT 模型,并进行定性分析,分析结果得到的重要底事件为 FMECA 界定了分析范围,而 FMECA 的结果,不仅可用于帮助确立系统的薄弱环节,还可做为 FTA 的反馈,对故障树中故障模式分解不够准确的地方进行修正,从而得到准确的 FT 模型,为 FTA 定量分析奠定基础,最后综合以上分

析结果, 得出逆向 FTF 结论。

3 应用实例

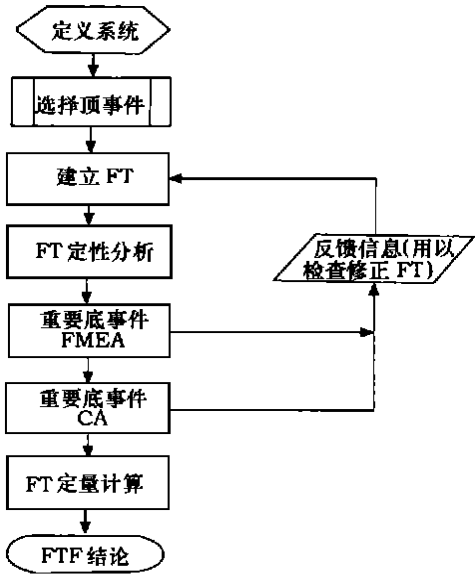


图 1 逆向 FTF 分析程序

燃气轮机以其优异的性能在船舶上得到了广泛应用。目前船舶燃气轮机大都配有自动化程度很高的三级监控系统, 从而使整个燃气轮机系统成为一

非常复杂的系统, 要详尽准确地分析故障原因, 得到实用性强的分析结果, 又能符合分析的及时性和有效性原则, 应选用上述逆向 FTF 方法, 下文介绍了该方法在某型船用燃气轮机起动故障分析中的应用。

3.1 FT 模型的建立及定性分析

通过功能分析及实践经验发现某型燃气轮机的起动过程, 涉及到燃气轮机的所有系统, 过程复杂且故障率高, 影响了燃气轮机起动快、机动性好能正常发挥的优点, 故选择 FT 顶事件为“起动失败”, 并对事件及系统的边界条件进行严格定义^[3]。在 FT 建造过程中需要权衡两方面的要求: (1) FT 应尽量包含系统内的所有事件以保持其严格的逻辑性; (2) 符合 FT 分析软件的解题规模。在两者发生矛盾时, 应对 FT 进行简化和模块化分解。这样以该型燃气轮机“起动失败”为顶事件建立的 FT 模型^[3] 包含 145 个逻辑门, 177 个底事件。对该 FT 定性分析求得的最小割集数为 253 个, 并归纳分析了 90 个一阶割集所对应的单点故障^[3], 作为下一步 FMECA 分析的重点。该 FT 模型经下一步修正后可供故障诊断使用, 也可用于人员培训, 并且是定量分析的数学模型。

3.2 FMECA

首先对上面得到的底事件, 特别是一阶割集给出的单点故障进行 FMEA, 即故障模式及影响分析,

包括故障模式的分析与归类, 故障模式严酷度分类及故障原因分析。其结果可对 FT 模型中故障模式的分解与定义不准确的地方进行纠正, 然后进行 CA 工作。

CA 的目的是确定各故障模式的故障率、故障影响概率、故障模式频数比及故障模式危害度, 进而得到部件的危害度。CA 结果一方面用于简化修正 FT, 即: 可把小概率且危害度小的事件, 从 FT 模型中略去, 以减小 FTA 分析的工作量; 另一方面 CA 结果为 FTA 定量分析提供底事件故障率数据。

综合 FMEA 和 CA 的结果, 得到 FMECA 的结果, 并以表格的形式给出^[3]。考察 FMECA 结果中每个部件的危害度和故障等级, 把含 I 级故障或危害度在 2.0 以上的部件定为 FMECA 的关键部件(表 1), 此关键部件清单可用以帮助确定系统的薄弱环节。

表 1 FMECA 的关键部件

部 件	故障等级	危害度
起动空气减压阀	III	3.67
燃油泵	II	3.24
起动空气调节阀	II	2.89
T _{5,4} 传感器	III	2.87
三通电磁阀	III	2.28
VSV 反馈机构	II	2.23
燃油控制器燃油出口管接头	I	1.26

3.3 FT 定量分析

根据最终确定的 FT 模型及 FMECA 提供的底事件故障率数据进行 FT 定量分析, 计算项目包括底事件的重要度和系统的不可用度。重要度的计算方法有多种^[2], 本文选用 Fussell 重要度来描述底事件重要度, 计算结果给出底事件重要度数及按重要度大小的底事件排序表^[3]。底事件重要度在系统设计及故障诊断中有重要意义, 可作为确定系统薄弱环节的重要依据。

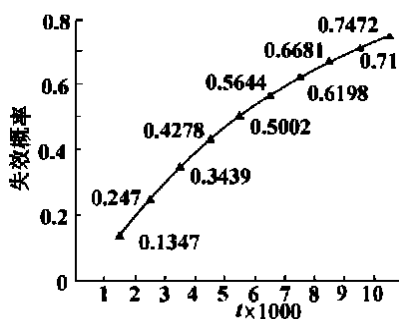


图 2 失效概率随时间的变化

系统不可用度指在给定工作时间内顶事件发生的概率, 用来评判系统的可靠性状态, 作为系统进一步改进设计的依据。本文利用独立近似方法, 计算系统的不可用度。假定系统已经历 10 000 小时的总任

务的不可用度。假定系统已经历 10 000 小时的总任

务时间,并把此时间分为 10 个时间间隔,计算各时间点处的不可用度,用最小二乘法拟合,得到系统不可用度(失效概率)随时间的变化曲线(图 2),并可计算出系统的可靠性参数:

$$\lambda = 1.381e^{-4}$$

$$MTBF = 7\,242 \text{ 小时}$$

3.4 逆向 FTF 结论及建议

(1) 通过 FT 的建造过程可知,电子控制系统的中央处理器插件板和电源插件板在系统结构中占有重要位置,两者之一发生故障不仅使顶事件发生而且使系统的状态监控失效,所以建议对中央处理器插件板进行冗余设计(电源板已采用冗余设计)。

(2) 定量分析得到系统的 MTBF 为 7 242 小时,小于 8 500 小时的设计指标。分析原因主要有两方面:一方面是由于存在部件设计缺陷,某些部件故障率过高,如电源板及起动空气减压阀等;另一方面是操作过程中人员失误造成。建议除改进某些部件设计外,还应针对人员失误的主要模式及各种诱发因素^[3]加强训练。

(3) 根据 FMECA 关键部件清单及 FTA 底事件重要度排序表,确定系统的薄弱环节为:

ECS 电源插件板 箱装体通风挡板
 起动空气减压阀 压气机通流部份(污染)
 VSV 反馈机构 燃油泵

起动空气调节阀 燃油控制器出口燃油管接头

T_{5.4}传感器 燃油控制器燃油比重调整旋钮

根据上述薄弱环节,可对系统的改进设计、故障诊断与维修进行深入的研究^[3]。

4 结语

本文提出的逆向 FTF 分析程序充分利用了 FMECA 和 FTA 的优点,避免了两者的缺陷,使之互为补足,分析结果准确、详尽、表达直观,不仅可以运用于系统的可靠性状态评判、故障诊断,而且可以指导管理人员具体的维修工作。该方法避免了正向 FTF 分析中的盲目性,使分析周期短,工作量较小,投资较少见效快,适合于当前船舶装备更新换代快的现状。本文的分析结果在船用燃气轮机故障分析及教学中收到了较好的效果。

参考文献:

- [1] GJB 1391—92. 故障模式、影响及危害性分析程序[S].
- [2] 朱继洲. 故障树原理及应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1989.
- [3] 刘永葆. FTF 方法在船用燃气轮机失效分析中的应用研究[D]. 武汉: 海军工程大学, 1996.

(渠 源 编辑)

英国海军船舶推进燃气轮机的使用经验

据《ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power》2000 年 10 月号报道,英国海军迄止使用的推进发动机是罗尔斯罗伊斯公司太茵、奥林普斯和斯贝航空发动机的船用化改型。未来的燃气轮机,对于英国海军预期是 WR21(24.5 MW)、5 到 8 MW 的发动机和 1 到 2 MW 发动机,以便支持舰船全电力推进项目。

为了满足英国海军船舶工程发展策略(MEDS),现代主原动机的标准是满足未来的排放法规,确保英国海军舰船在所有外国港口受到欢迎;低的海上维护要求并减少人力;高的可靠性和利用率;部分负荷和全功率下高的热效率;最小的总的寿命周期费用;高的功率密度。

综合全电力推进(IFEP)装置的得益是减少了原动机的数量,从而减少了机组生产费用;增加了电力和推进功率的利用率;减少了维护;减少了燃油消耗;增加了生命力。

研究表明,最佳的一族原动机应该是 24.5 MW 的 WR21, 5—7 MW 和 1—2 MW 的燃气轮机交流发电机组。5—7 MW 提供护卫舰或驱逐舰的巡航功率,1—2 MW 提供港湾负荷或低速运行并作为紧急返回基地的动力装置。驱逐舰和护卫舰大概需要 2 台 WR21 发动机以便达到其 30 节最大航速,航空母舰需要 4 和 8 台 WR21,以便达到其最大航速。1—2 MW 发动机也适用于扫雷艇。

(思娟 供稿)

Post Code: 266033) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 447 ~ 449

Presented is a highly cost-effective mode of electric power generation, the so-called thermal power and pumped storage-based electric power generation. Under the above-mentioned power generation mode a steam turbine directly drives a water pump for pumped storage power generation, thereby reducing the secondary energy conversion link and making it possible to enhance power generation efficiency by 11%. The boiler, steam turbine and pumps all can operate at a full rated load, thus attaining the maximum efficiency. Moreover, the thermal power and pumped storage-based power generation system enjoys a higher operational safety, a better peak load shaving capability and greater savings in condenser circulating water. Furthermore, it also entails a moderate investment outlay. **Key words:** thermal power and pumped storage-based power generation, peak load shaving, electrical power economy

逆向 FTF 方法在船用燃气轮机故障分析中的应用 = **The Application of Reverse FTF Method in the Fault Analysis of Marine Gas Turbines** [刊, 汉] / LIU Yong-bao (Naval Engineering University, Wuhan, China, Post Code: 430015), HAN Feng-ke (Harbin Turbine Works, Harbin, China, Post Code: 150046) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 450 ~ 452

Discussed are the specific features of FTA (failure tree analysis) and FMECA (failure mode effect criticality analysis) as well as the interrelationship between the two methods of analysis. On this basis the authors have come up with a reverse FTF (FTA + FMECA = comprehensive analysis method) method to analyze system reliability. With the help of the above-cited method a quantitative analysis was conducted of the start-up failure of a marine gas turbine with vulnerable links in the turbine system being identified and practical countermeasures suggested. **Key words:** failure analysis, fault tree analysis, gas turbine

燃用褐煤锅炉改烧烟煤时干燥剂的计算及选取 = **The Calculation and Selection of Drying Agents in Connection with the Change of Fuel for a Boiler from Brown Coal to Bituminous One** [刊, 汉] / SHU Ji-wei, MENG Fan-bing (Energy Engineering College under the Harbin Institute of technology, Harbin, China, Post Code: 150006), HUANG Qi-long (Heilongjiang Provincial Electric Power Research Academy, Harbin, China, Post Code: 150030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 453 ~ 456

Contrast tests were conducted concerning a 200 MW brown coal-fired boiler prior to and after its modification to firing bituminous coal of Heilongjiang Province. During the tests it has been found that after a change of coal to the bituminous one the boiler enjoyed a stable combustion and basically attained the same design efficiency as that of the brown coal-fired boiler. No severe slag-formation has been detected. However, regarding the pulverized coal preparation system there was an excessively high temperature and oxygen content of flue gas at the coal mill outlet. Through a renewed thermodynamic calculation and selection of the drying agent it was decided to adopt a more rational drying mode involving the use of "high-temperature boiler flue gas + hot air + pressurized cooling air". The latter can also meet the explosion-proof requirements of the pulverized coal preparation system. **Key words:** brown coal, bituminous coal, pulverized coal preparation system, drying agent

邻炉高温风加热技术的应用 = **An Exploratory Study on the Technique of Using High-temperature Air from a Neighboring Boiler** [刊, 汉] / MENG Xiang-jun (Changjiakou Xiahuyuan Power Plant in Hebei Province, Changjiakou, Hebei Province, China, Post Code: 075300) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 457 ~ 458

Prior to conducting the start-up of a peak load-shaving boiler it is essential to enhance the metal temperature of its various components. This plays a very unique role in attaining the rapid and stable ignition and burning of the pulverized coal at the early period of the boiler start-up. In view of the above one should pay due attention to improving the high-temperature air heating system of a neighboring boiler so that the high-temperature air can be made available during the whole process of a boiler start-up. The addition of a recirculation pipe for the neighboring boiler high-temperature air may improve the above-mentioned heating system and render its design more rational. **Key words:** boiler, high-temperature air, heating system